



PMR 2433 Eletrônica Analógica e Digital

2º Semestre 2015

Experiência 6

RETIFICADORES E FILTROS CAPACITIVOS

PARTE I TEORIA

Esta experiência aborda o estudo de circuitos retificadores, capazes de transformar correntes alternadas (CA) em correntes retificadas que apresentam uma componente contínua não nula (CC).

6.1 Valor Eficaz e Ângulo Elétrico

Convém lembrar que tensões alternadas são especificadas em termos de seu valor eficaz (ou RMS, *root mean square*). Por definição, o valor eficaz V_{ef} de um sinal $v(t)$ é dado por

$$V_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v(t)^2 dt}, \quad (6.1)$$

onde T é o intervalo de integração, que no caso de sinais repetitivos é igual ao período do sinal. Para um sinal senoidal de amplitude V_p (ou *valor de pico*) e frequência ω , tal que $v(t) = V_p \cdot \sin(\omega t)$, a expressão 6.1 resulta

$$V_{ef} = \frac{V_p}{\sqrt{2}} \cong 0,71 V_p. \quad (6.2)$$

Ou seja, o valor eficaz é menor que o valor de pico do sinal, correspondendo a aproximadamente 71%. A Figura 6.1 ilustra essa relação. Note que o eixo vertical do gráfico não representa o tempo, mas é dado em radianos pelo ângulo ωt , o chamado *ângulo elétrico*, onde ω é a frequência angular da senoide e t é o tempo. Isso é conveniente para a análise de sinais senoidais, uma vez que permite normalizar intervalos de tempo em termos da frequência do sinal. Ou seja, um ciclo de senoide terá sempre 2π radianos, não importando a frequência ω .

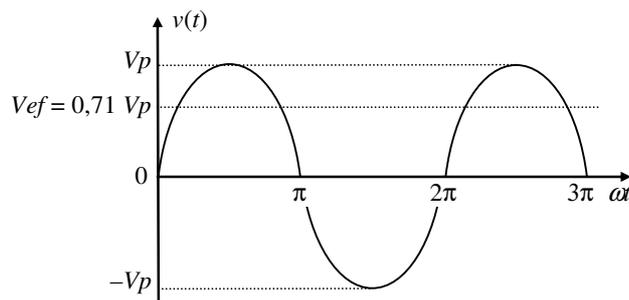


Figura 6.1 Sinal senoidal e valor eficaz

6.2 Transformador

Nesta experiência, utilizaremos também um transformador para reduzir a tensão da rede elétrica para níveis mais seguros e apropriados para nosso trabalho em laboratório. A Figura 6.2 mostra o símbolo de um transformador ideal, com N_1 espiras no enrolamento primário e N_2 espiras no enrolamento secundário.

A relação entre as tensões no transformador é dada por

$$\mathbf{V}_2 = \frac{N_2}{N_1} \mathbf{V}_1, \quad (6.3)$$

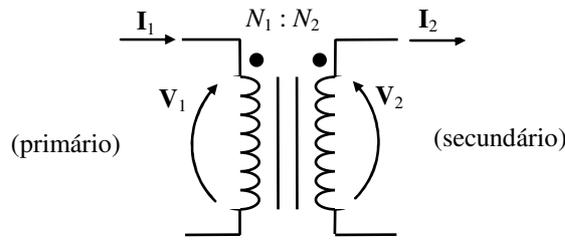


Figura 6.2 Transformador ideal

onde N_2/N_1 é a chamada *relação de transformação*, e \mathbf{V}_1 e \mathbf{V}_2 são os *fasores* das tensões do primário e do secundário. Um transformador permite tanto elevar ($N_2 > N_1$) como abaixar ($N_2 < N_1$) a tensão de \mathbf{V}_2 com relação à entrada \mathbf{V}_1 . Os pontos pretos são *marcas de polaridades*, e no caso da Figura 6.2 indicam que \mathbf{V}_2 estará em fase com \mathbf{V}_1 .

Uma vez que o transformador é um dispositivo passivo, as correntes obedecem uma relação inversa, para que a potência de saída no secundário seja igual à potência de entrada no primário. Ou seja, tem-se

$$\mathbf{I}_2 = \frac{N_1}{N_2} \mathbf{I}_1, \tag{6.4}$$

tal que $\mathbf{V}_1 \cdot \mathbf{I}_1 = \mathbf{V}_2 \cdot \mathbf{I}_2$ (sendo \mathbf{I}_2 e \mathbf{I}_1 também senoidais, de frequência igual a da tensão de entrada).

Lembrando: um fasor é um número complexo que representa a amplitude e a fase de uma grandeza em regime permanente senoidal. Por exemplo, se $f(t) = A \cdot \sin(\omega t + \phi)$ é uma função senoidal de frequência ω e fase ϕ , ela pode ser representada por um vetor girando no plano complexo com frequência ω , do qual se observa apenas sua projeção no eixo real, ou seja, $f(t) = \text{Re}\{\sqrt{2}\mathbf{F}e^{j\omega t}\}$, onde

$$\mathbf{F} = \frac{1}{\sqrt{2}} A e^{j\phi} \tag{6.5}$$

é o fasor da função f , neste exemplo expresso em valor eficaz (RMS).

6.3 Retificador de Meia-Onda

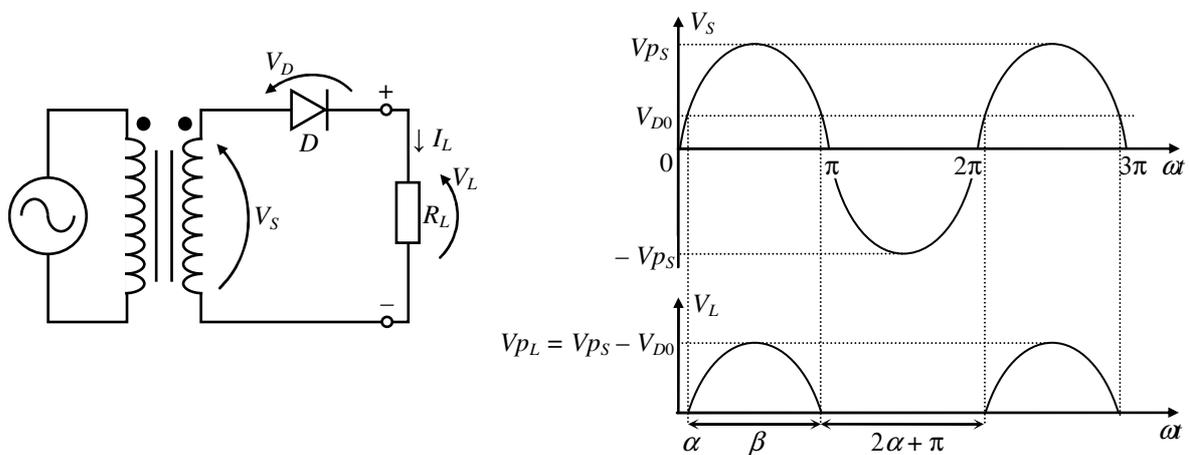


Figura 6.3 Retificador de meia-onda e forma de onda resultante.

A Figura 6.3 mostra o circuito conhecido como retificador de meia-onda. Como se vê no gráfico, o diodo começa a conduzir a partir do *ângulo de disparo* α , quando a tensão do secundário ultrapassa a tensão V_{D0} de limiar do diodo. A partir desse ponto, o diodo conduz durante o *ângulo de condução* β .

No trecho entre $(\pi - \alpha)$ e $(2\pi + \alpha)$, a tensão cai abaixo de V_{D0} e o diodo fica polarizado reversamente. Desprezando-se a corrente reversa de fuga no diodo, tem-se que a corrente e a tensão da carga caem a zero.

O ângulo de disparo α e o ângulo de condução β podem ser calculados por

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{V_{D0}}{V_{pS}}\right), \tag{6.6}$$

$$\beta = \pi - 2\alpha. \tag{6.7}$$

A amplitude V_{pL} da tensão retificada é menor que a tensão de pico V_{pS} do secundário devido a queda de tensão no diodo (admitindo $V_{pS} > V_{D0}$), ou seja

$$V_{pL} = V_{pS} - V_{D0}. \quad (6.8)$$

Nos casos em que a amplitude V_{pS} do secundário é muito maior que V_{D0} , o ângulo α é pequeno e pode-se dizer que o diodo conduz durante praticamente todo o semiciclo positivo de V_S e permanece cortado no restante do ciclo. Assim, a tensão média V_{mL} na carga é dada aproximadamente por

$$V_{mL} = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi-\alpha} V_{pL} \sin(\omega t) d(\omega t) \cong \frac{V_{pL}}{\pi}. \quad (6.9)$$

Quando o diodo está polarizado reversamente, ele se mantém cortado e toda a tensão do secundário do transformador é suportada pelo diodo. Portanto a tensão de pico reversa (V_R) que deve ser especificada para o diodo retificador em um circuito de meia-onda é $-V_{pS}$ (tensão de pico negativa do secundário).

Por fim, repare que o retificador da Figura 6.3 também funcionaria se o diodo D fosse montado ao contrário, mas com isso a polaridade da tensão de saída seria invertida também.

6.4 Retificador de Onda Completa usando Transformador com Tap Central

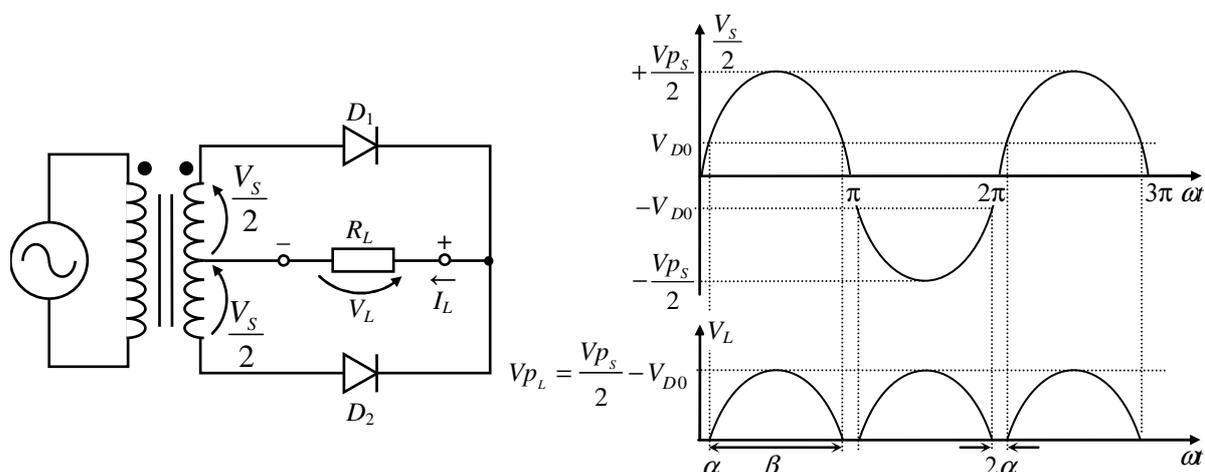


Figura 6.4 Retificador de onda completa e forma de onda resultante.

A Figura 6.4 mostra um retificador de onda completa, construído com um transformador com *tap* central (derivação do secundário que o divide em dois enrolamentos iguais). Durante o semiciclo positivo da tensão do secundário, o diodo superior D_1 está polarizado diretamente enquanto o diodo inferior D_2 encontra-se reversamente polarizado (no seu anodo, temos $-V_S/2$). Portanto, a corrente passa pelo diodo D_1 , pelo resistor de carga e pela metade superior do enrolamento secundário do transformador.

Durante o semi-ciclo negativo, a corrente passa pelo diodo inferior, pelo resistor de carga e pela metade inferior do enrolamento. Assim a tensão de carga possui os dois semiciclos de senoide retificados, como mostra a Figura 6.4. Note que a tensão na carga é a metade da tensão do secundário, uma vez que em cada semiciclo apenas uma das metades do secundário é utilizado.

Considerando-se a queda de tensão V_{D0} dos diodos seja a mesma, a tensão de pico na carga é dada por

$$V_{pL} = \frac{V_{pS}}{2} - V_{D0}. \quad (6.10)$$

Os ângulos de disparo (α) e de condução (β) dos diodos são dados pelas mesmas expressões do retificador de meia onda (respectivamente, 6.6 e 6.7). Aproximando o ângulo de condução por π , o valor médio V_{mL} da onda de saída é dado por

$$V_{mL} = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi-\alpha} V_{pL} \sin(\omega t) d(\omega t) \cong 2 \frac{V_{pL}}{\pi}, \quad (6.11)$$

que é o dobro do fornecido por um retificador de meia-onda, para um mesmo valor de pico (V_{pL}) na carga.

Observe que os diodos conduzem alternadamente. Cada diodo conduz metade da corrente média da

carga. Logo, a especificação de corrente de um diodo para retificação em onda-completa é a metade da corrente requerida pela carga. Por outro lado, a tensão de pico inversa que o diodo deve suportar é a tensão apresentada nos extremos do secundário. Portanto, neste caso o diodo deve suportar o dobro da tensão de pico na carga.

O transformador com tap-central tem a desvantagem de requerer dois enrolamentos no secundário, o que aumenta o custo e o tamanho do transformador. Por isso, a solução mais usada é a que veremos a seguir.

6.5 Retificador em Ponte

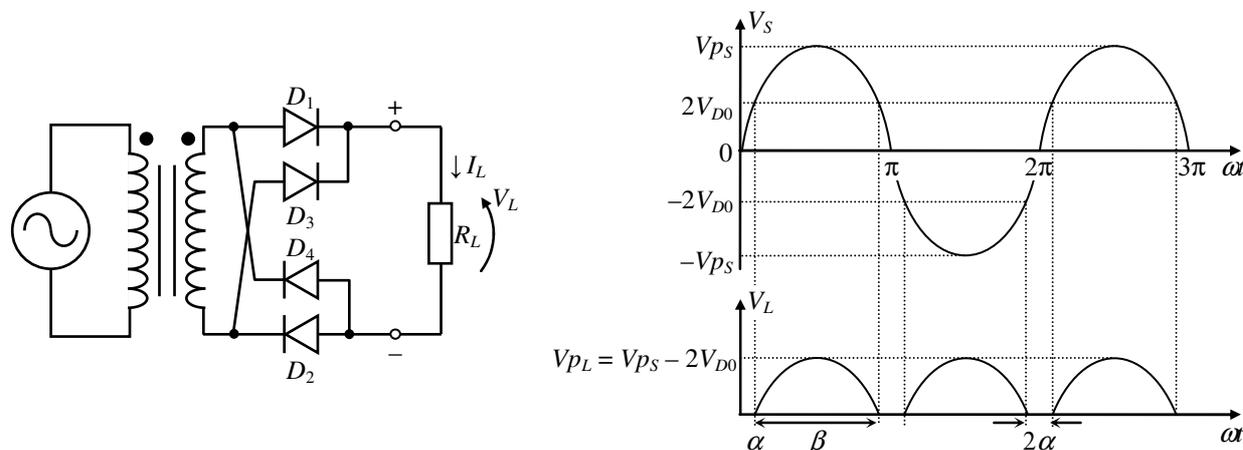


Figura 6.5 Retificador em ponte e forma de onda resultante.

A Figura 6.5 mostra um retificador em ponte. Durante o semiciclo positivo, temos V_S positivo e os diodos D_1 e D_2 são polarizados diretamente. Portanto, a corrente circula por esses dois diodos, passando pela carga da direita para a esquerda.

No semiciclo negativo, V_S é negativo e os diodos D_1 e D_2 estão reversamente polarizados, permanecendo cortados. Por sua vez, os diodos D_3 e D_4 conduzem, permitindo a passagem de corrente na carga na mesma direção anterior.

Como sempre temos dois diodos em série conduzindo, somente haverá tensão e corrente na carga quando a tensão V_S do secundário ultrapassar o dobro da tensão V_{D0} de limiar dos diodos. Assumindo que essa tensão seja igual em todos os diodos, o ângulo de disparo será dado por

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{2V_{D0}}{V_{pS}}\right), \quad (6.12)$$

a tensão de pico na carga será

$$V_{pL} = V_{pS} - 2V_{D0}. \quad (6.13)$$

A tensão média neste caso possui a mesma expressão do retificador de onda completa (equação 6.11), lembrando que neste caso a tensão de pico V_{pL} é menor (expressão 6.13) e o ângulo de disparo α é praticamente o dobro, reduzindo o ângulo de condução β em cada semiciclo.

Uma vantagem do retificador em ponte é que a tensão inversa que o diodo deve suportar é do mesmo valor da tensão de pico na carga (V_{pL}). No entanto, como há dois diodos em série com a carga conduzindo em cada semiciclo, a queda de tensão devido aos diodos é o dobro.

A Figura 6.6 mostra o mesmo circuito do retificador com ponte de quatro diodos desenhado de forma um pouco diferente (os terras da esquerda e da direita estão interligados, é claro). Nenhum dos terminais da carga está ligado diretamente ao secundário do transformador, ao contrário do que acontece no retificador de meia onda (Figura 6.3) e no retificador com tap central (Figura 6.4).

Isto não é propriamente um problema, mas impede que se observe as formas de onda da figura anterior no osciloscópio disponível no laboratório, que tem o terra comum aos dois canais. Repare na Figura 6.6: o ponto de referência das tensões V_L e V_S NÃO É o mesmo. Para ver esses sinais, os terras dos canais teriam que ser *isolados* entre si.

A Figura 6.6 evidencia também um cuidado que deve ser tomado ao se montar uma ponte de diodos: invertendo-se qualquer um dos diodos, coloca-se em curto o secundário do transformador, o que queimaria o par de diodos em curto ou o transformador – ou ambos!

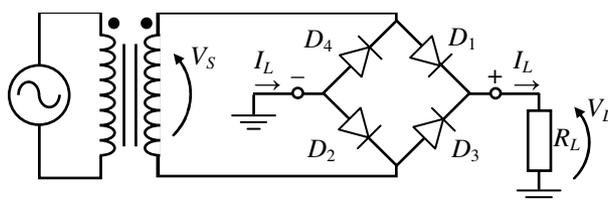


Figura 6.6 Terminais de saída do retificador em ponte

6.6 Comparação entre os retificadores

A Tabela 6.1 descreve uma comparação entre os retificadores discutidos. Observa-se na última linha da tabela uma comparação entre a tensão CC na saída e o valor eficaz da onda no secundário do transformador. Observe que nos retificadores em ponte a tensão média V_{mL} é 0,64 vezes a tensão de pico na carga (V_{pL}), e que toda a tensão do secundário é aproveitada. Este fato se traduz em um melhor aproveitamento da potência entregue pelo transformador, permitindo o uso de transformadores menores.

Tabela 6.1 Comparação entre os retificadores

	Meia Onda	Completa/Tap	Ponte
Número de diodos	1	2	4
Tensão de pico na carga (V_{pL})	$V_{pS} - V_{D0}$	$0,5V_{pS} - V_{D0}$	$V_{pS} - 2V_{D0}$
Tensão média na carga (V_{mL})	$0,32 V_{pL}$	$0,64 V_{pL}$	$0,64 V_{pL}$
Corrente média nos diodo (I_{mD})	I_{mL}	$0,5 I_{mL}$	$0,5 I_{mL}$
Tensão de pico reversa (V_R)	$-V_{pS}$	$-(2V_{pL} + V_{D0})$	$-(V_{pS} - V_{D0})$
Frequência de ondulação	f_N	$2 f_N$	$2 f_N$

- Notas
1. V_{pS} : tensão de pico do secundário.
 2. I_{mL} : corrente média na carga
 3. f_N : frequência nominal de entrada.
 4. V_{D0} : tensão de limiar (joelho) do diodo

6.7 Filtro Capacitivo

A retificação produz uma onda pulsante na saída. Entretanto, quando se deseja produzir uma tensão contínua para alimentar circuitos eletrônicos, deve-se filtrar a tensão retificada de modo a obter uma tensão com baixa ondulação. Uma forma de realizar a filtragem é através da adição de um capacitor em paralelo com a carga.

A Figura 6.7 mostra um capacitor adicionado a um retificador de meia-onda, e a forma de onda da tensão resultante sobre a carga. A senoide retificada está representada em linha tracejada. O traço em linha cheia indica a forma de onda na saída, devido à ação do capacitor. Durante o ângulo de condução β o capacitor se carrega através do diodo.

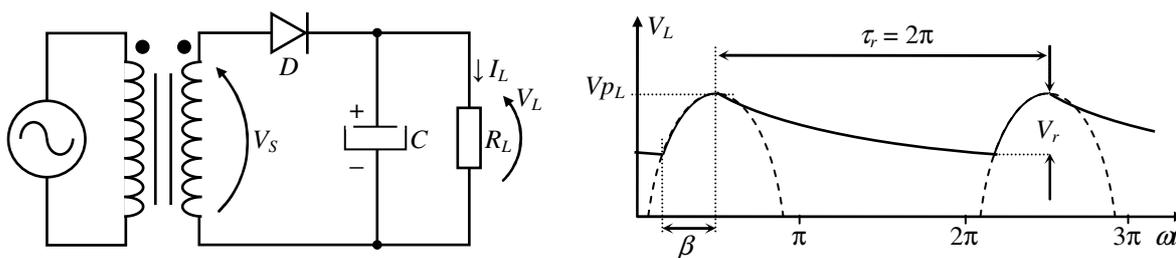


Figura 6.7 Retificador de meia-onda com filtro capacitivo e forma de onda de tensão na carga

Durante o intervalo de $\tau_r - \beta$, os diodos não conduzem e apenas o capacitor fornece corrente à carga; nessas condições a tensão sobre o resistor de carga R_L decai exponencialmente, segundo

$$V_L = V_{pL} e^{-t/R_L C}. \quad (6.14)$$

A Figura 6.8 mostra a filtragem resultante de um retificador de onda-completa (aqui representado em uma terceira forma equivalente). Na Figura 6.7 e na Figura 6.8, repare que o capacitor utilizado apresenta indicação de polaridade. Trata-se, portanto, de um capacitor de tântalo ou eletrolítico. Lembre-se: esses capacitores não podem ser ligados invertidos pois podem explodir.

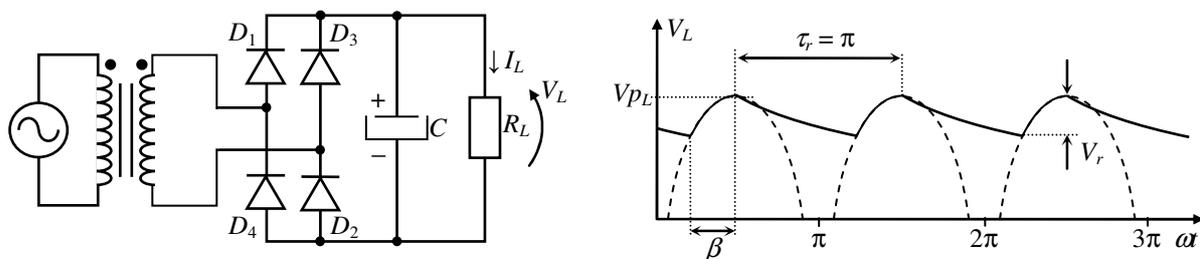


Figura 6.8 Retificação de onda completa com filtro capacitivo e forma de onda da tensão na carga

Vamos ver como estimar uma capacitância C que limite a ondulação da tensão (ou *ripple*) na carga a um valor desejado V_r . Podemos admitir que a ondulação seja muito menor que a tensão de pico na carga ($V_r \ll V_{pL}$), e o período da ondulação T_r ($T_r = \tau_r / \omega$ ou $T_r = \tau_r / 2\pi f$) seja muito menor que a constante de tempo $R_L C$ do circuito ($T_r \ll R_L C$). Por fim, o ângulo de condução β tende a zero para uma amplitude de ondulação muito pequena. Assim podemos aproximar a forma de onda de carga e descarga do capacitor por retas. As formas de onda aproximadas estão ilustradas na Figura 6.9, onde voltamos a representar o tempo no eixo horizontal.

Note que no retificador de meia-onda, o período de ondulação (T_r) é igual ao período da senoide de entrada (T), enquanto que no retificador de onda completa o período de ondulação cai pela metade, reduzindo dessa forma a amplitude de ondulação V_r caso o mesmo capacitor seja usado em ambos.

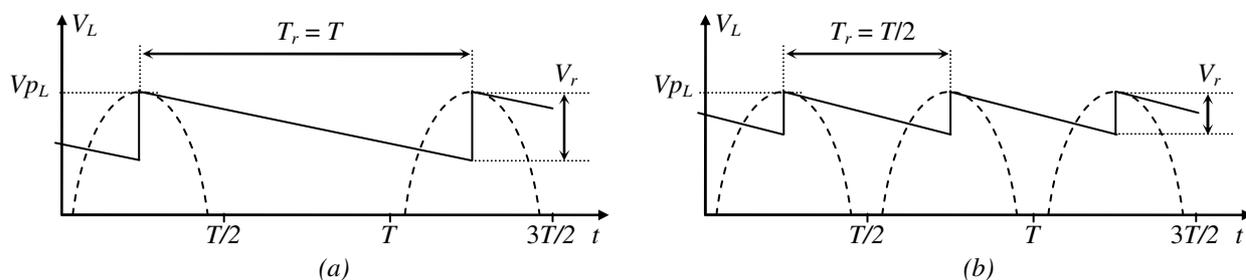


Figura 6.9 Saída aproximada do filtro capacitivo no retificador de meia-onda (a), e de onda completa (b)

Observando a Figura 6.9, vemos que a variação da tensão de saída pode ser aproximada por $dV_L/dt = V_r/T_r$. A tensão na carga V_L é igual a tensão no capacitor, e com os diodos cortados a corrente na carga também é igual a corrente fornecida pelo capacitor. Como aproximamos a descarga do capacitor por uma reta, a corrente de saída deve ser aproximadamente constante, e neste caso igual a corrente média no resistor R_L , que podemos aproximar por

$$I_{mL} \cong \frac{1}{R_L} \left(V_{pL} - \frac{V_r}{2} \right). \quad (6.15)$$

A capacitância C é definida pela razão entre as variações de carga e tensão no capacitor, portanto

$$C = \frac{I_{mL} T_r}{V_r}, \quad (6.16)$$

lembrando que T_r é o período da ondulação na carga – igual ao período T da senoide de entrada no retificador de meia-onda e metade disso no caso do retificador de onda completa.

6.8 Corrente de Surto

À primeira vista, parece ser uma boa ideia usar um capacitor de valor elevado para ter uma tensão praticamente constante na carga, não? No entanto, isso pode queimar os diodos do retificador. Durante a carga do capacitor, o diodo é submetido a uma corrente elevada, chamada *corrente de surto*.

Repare, por exemplo, no circuito retificador de meia onda da Figura 6.7: toda carga elétrica que atravessa o resistor R_L deve obrigatoriamente passar pelo diodo D , já que o capacitor funciona apenas como um reservatório intermediário. Um capacitor maior leva a um tempo de descarga maior, e portanto o tempo de condução do diodo diminui. Conduzindo por menos tempo a cada ciclo, a corrente I_D através do diodo deve aumentar para manter a mesma corrente média de saída.

Para estimar essa corrente, vamos começar determinando o ângulo de condução β . Durante a condução dos diodos, a tensão na carga V_L acompanha a forma de onda do secundário V_S (a queda de tensão V_{D0} nos

diodos desloca a tensão V_L para baixo, mas como estamos interessados na ondulação em relação ao pico da senoide, essa queda não afeta nossos cálculos). Após o intervalo β , os diodos deixam de conduzir e o capacitor se descarrega através do resistor R_L até sua tensão se igualar à tensão de entrada no próximo ciclo da senoide, conforme mostra a Figura 6.10.

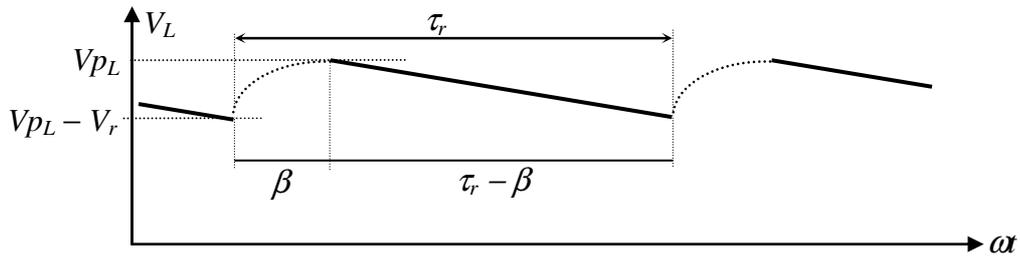


Figura 6.10 Curva de carga e descarga da tensão do capacitor

A Figura 6.11 mostra que o ângulo β vai do ponto em que a tensão senoidal V_S está V_r abaixo do pico até o momento que atinge o valor máximo V_{pS} . Nessa figura, incluímos um referencial auxiliar θ , com origem defasada de $\pi/2$ e apontando para a esquerda.

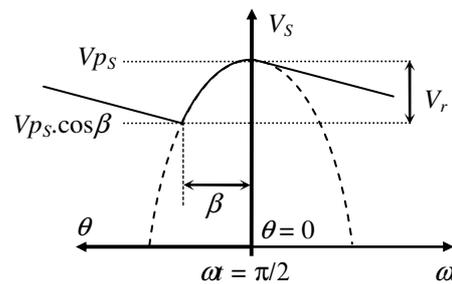


Figura 6.11 Cálculo do ângulo de condução do diodo.

Com relação a esse referencial θ , temos que

$$\beta = \arccos\left(\frac{V_{pS} - V_r}{V_{pS}}\right). \quad (6.17)$$

Como o diodo conduz apenas durante o ângulo β , a corrente média I_{mD} no diodo em um período τ_r é

$$I_{mD} = \frac{1}{\tau_r} \int_0^\beta I_D d(\omega t) \approx \frac{\beta}{\tau_r} I_{Dm\acute{a}x}, \quad (6.18)$$

onde aproximamos a corrente I_D durante o ângulo β por uma corrente constante igual a $I_{Dm\acute{a}x}$. A corrente média que atravessa o diodo deve ser igual a corrente média fornecida à carga I_{mL} (expressão 6.15). Temos então que

$$I_{Dm\acute{a}x} = \frac{\tau_r}{\beta} I_{mL}. \quad (6.19)$$

Como observaremos as formas de onda descritas acima no osciloscópio durante a parte prática, convém converter o ângulo β em tempo de condução t_β por meio de $t_\beta = \beta/\omega$ ou $t_\beta = \beta/2\pi f$, onde f é a frequência da senoide de entrada.

6.9 Distorção harmônica

Nos circuitos retificadores que vimos, a comutação dos diodos faz com que as correntes que circulam no transformador deixem de ser perfeitamente senoidais. Nos momentos em que um diodo começa a conduzir ou entra em corte, ocorrem transições bruscas de corrente que induzem distorções de tensão nos enrolamentos do transformador (lembre-se que em indutores a tensão é proporcional à derivada da corrente).

Como resultado, a tensão gerada pelo transformador também deixa de ser uma senoide pura. A tensão continua a ser periódica, composta pela senoide fundamental de frequência igual à da rede, a qual se somam componentes harmônicas (de frequências múltiplas da fundamental). Você poderá observar esse efeito durante a parte prática.

Esse é um pequeno exemplo de um grande problema que afeta os sistemas de energia elétrica nos dias de hoje: a grande quantidade de equipamentos eletrônicos em uso induz distorções harmônicas até mesmo nas linhas de distribuição. A presença de componentes harmônicas elevadas pode afetar equipamentos mais sensíveis e aumenta as perdas ôhmicas nos condutores. Por isso, existem normas que estabelecem a *qualidade de energia* da rede, limitando a proporção das harmônicas (principalmente as primeiras ímpares).

6.10 Materiais

6.10.1 Diodos

Usaremos diodos da série 1N4000. São diodos de silício, apropriados para a retificação de correntes de até 1 A em baixas tensões. Consulte o *datasheet* anexo.

6.10.2 Transformador

No transformador a ser utilizado na experiência, os enrolamentos secundários estão disponíveis através de bornes e identificados por (8V 8V) e (15V N 15V), conforme ilustrado na Figura 6.12. O primário deste transformador deve ser ligado na rede elétrica.

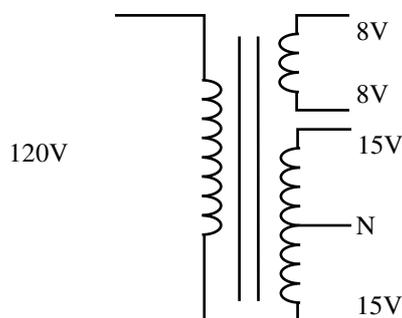


Figura 6.12 Transformador usado na experiência.

O secundário inferior tem uma derivação central (N) que permite obter 30 V eficazes entre os dois bornes “15V” ou duas tensões de 15 V eficazes defasadas de 180° entre “N” e os bornes “15V”.

6.11 Pré-Relatório

ATENÇÃO: leia as atividades por completo para fazer os exercícios corretamente!

Total de exercícios: 10

O *pré-relatório* é composto pelos EXERCÍCIOS contidos nesta apostila. Você deverá entregar o pré-relatório até o começo da aula de sua turma, caso contrário não poderá fazer a experiência. Os exercícios podem ser resolvidos a lápis, mas as respostas finais devem ser escritas **à caneta**. Faça-os com **antecedência**, para ter tempo para tirar dúvidas e fazer **todos** os exercícios.

A nota do pré-relatório depende também de uma **ARGUIÇÃO ORAL** que poderá ser feita em a aula. Portanto, **revise** o pré-relatório e a apostila antes da aula. A arguição oral também poderá ser feita para esclarecer partes confusas ou mal feitas no pré-relatório, por isso é importante que você o faça com **esmero**.

Leia com atenção todas as atividades da Parte II antes da aula, e não apenas os exercícios. Isso é necessário para fazer os exercícios corretamente pois muitos detalhes estão descritos nas atividades em que se inserem. Além disso, você já terá uma noção das atividades e perderá menos tempo durante a aula.

Traga para a aula a apostila **IMPRESSA**. Os pontos importantes das atividades devem estar **destacados ou grifados**. As anotações serão avaliadas e contarão na nota final da experiência.

IMPORTANTE: faça com cuidado os diagramas elétricos dos circuitos e as formas de onda pedidos no pré-relatório. Caso contrário, você terá que REFAZÊ-LOS no laboratório.

PARTE II PRÁTICA

Atividade 1 Transformador e ajuste inicial do osciloscópio

Anotação 1a Anote no cabeçalho do relatório: nome dos integrantes da equipe, número da bancada e a hora de início das atividades.

Verifique a calibração das pontas de prova do osciloscópio.

- ✓ Conecte as pontas dos canais 1 e 2 no terminal de calibração (“*Probe Comp*”) do osciloscópio.
- ✓ Conecte a garra de referência (terra) da ponta do canal 1 no terminal inferior (GND).
- ✓ Aperte o botão “*Auto Sel*” do osciloscópio.

Veja as ondas quadradas de 5 V e 1 kHz. Se a ponta não estiver bem calibrada, ao contrário da borda do sinal, você verá um canto arredondado ou um sobre-sinal. Para se calibrar uma ponta, ajusta-se o capacitor de compensação por um pequeno parafuso. **O parafuso é bastante frágil!** NÃO MEXA nele sem antes chamar o professor. Havendo pouca distorção, não se preocupe – não precisaremos de alta precisão.

Vamos fazer alguns ajustes iniciais no osciloscópio antes de usá-lo nas próximas atividades.

- ✓ **Ativação e seleção de canais:** botão “1” e botão “2”.
- ✓ **Atenuação 10x para as duas pontas:** selecione o canal; o menu “*Probe*” deve mostrar “10X Voltage” – caso contrário, selecione o menu “*Probe*” e em seguida o menu “Attenuation” até ajustar em “10X”.
- ✓ **Acoplamento DC nos dois canais:** selecione o canal e ajuste o menu “*Coupling*” para “DC”.
- ✓ **Limite de banda nos dois canais:** selecione o canal e ajuste o menu “*BW Limit*” para “On 20MHz”.
- ✓ **Configurações de Trigger:** aperte o botão “*Trig Menu*” e faça os seguintes ajustes
 - **Source:** CH1 – compara o sinal no canal 1 com o nível ajustado de *trigger* para gerar os disparos
 - **Type:** Edge – faz com que o instante de *trigger* seja uma das bordas do sinal *Source*
 - **Slope:** Rising – gera os disparos nas bordas de subida do sinal *Source*
 - **Mode:** Auto – gera disparos automaticamente caso o sinal *Source* não atinja o nível de *trigger*.
 - **Coupling:** DC – mantém o nível DC do sinal *Source* ao compará-lo com o nível ajustado de *trigger*.

ATENÇÃO: a partir de agora, NÃO APERTE mais o botão “*Auto sel*”

Não usaremos a ponta do canal 2 do osciloscópio por hora. Para não deixá-la perdida na bancada, prenda-o no terminal de terra do painel do osciloscópio (abaixo do “*Probe Comp*”) e desative o canal 2.

Como alimentação V_S nos circuitos retificadores, usaremos 8 V eficazes fornecidos pelo secundário do transformador, que será alimentado com a tensão da rede (nominalmente, 127 V_{ef} e 60 Hz).

- ✓ Conecte a ponta e o terra do canal 1 nos terminais “8V” do transformador (a polaridade não importa)
- ✓ Ligue o transformador na tomada e ligue a chave deste

Ajuste as escalas horizontal e vertical para ter uma primeira visão da forma de onda. Um bom começo é ver um período do sinal em pelo menos uma divisão horizontal e vertical.

- ✓ Como a frequência f é de 60 Hz, o período T é de... 16,7 ms (certo?).
- ✓ A amplitude é de... $8 V_{ef} \times 1,41 = 11,3 V$, portanto a amplitude pico a pico total é de 22,6 V (óbvio).
- ✓ Comece com horizontal = 10 ms/div e vertical = 10 V/div (ou escalas próximas a estas).
- ✓ Centralize o sinal verticalmente na tela (mexa no botão “Position” do canal 1).

Se este sinal não aparecer estático na tela, é necessário ajustar o nível de *trigger* (cujo sinal *Source* é o CH1, certo?). Ajuste o botão “*Level*” para que o nível de *trigger* (indicado por um “←” na lateral DIREITA da tela) fique no meio da excursão vertical do sinal. Para fazer isso, o botão “*Set to 50%*” ajuda, mas você pode ainda precisar fazer alguns ajustes pelo botão “*Level*” para estabilizar o sinal na tela.

Para que se possa ver melhor a onda, convém que um período ocupe umas 4 divisões. Portanto, diminua a escala horizontal. Da mesma forma, diminua o ganho vertical para que o sinal ocupe umas 4 divisões de amplitude. Como o transformador está operando sem carga, a forma de onda deve ser uma senoide.

Anotação 1b O sinal é uma senoide de nível DC é nulo, como esperado? Meça e anote o período T (em ms) e a tensão de pico V_{ps} do secundário. Para medir V_{ps} com melhor precisão, meça a amplitude pico a pico (V_{pp}) e divida por 2.

Anotação 1c Anote o horário de término desta atividade.

Atividade 2 Retificador de meia onda

Vamos montar o retificador de meia onda da Figura 6.3. Como alimentação V_S , use 8 V eficazes fornecidos pelo secundário do transformador. Use como carga R_L um resistor de 1 k Ω .

Exercício 1 Faça o diagrama elétrico do circuito a ser montado, incluindo o transformador. Indique os pontos em que os canais 1 e 2 e o TERRA do osciloscópio serão conectados. Junto aos componentes, anote o nome de identificação e código comercial ou valor comercial (ex: “D 1N4001”, “ R_L 1k”). O código do diodo deve ser o escolhido no Exercício 5.

Anotação 2a Caso seu esquema elétrico tenha sido considerado satisfatório pelo professor, NÃO é necessário refazê-lo – indique no relatório qual projeto foi escolhido para ser montado. CASO CONTRÁRIO, faça o esquema corretamente no relatório.

Monte o circuito no *protoboard*. Observe V_S no canal 1: note como o retificador distorce a forma de onda. Amplie para que o sinal ocupe o máximo possível da excursão vertical e se possa ver pelo menos 1 período na tela.

Observe a tensão V_L na carga no canal 2 (em DC). Use a mesma escala vertical do canal 1. Alinhe o nível de referência dos dois canais verticalmente na linha central da tela. Verifique se V_L se resume ao semiciclo positivo de V_S , recortado na parte de baixo pela tensão de limiar do diodo.

Exercício 2 O diodo a ser usado nesta atividade é de silício – considere $V_{D0} = 0,7$ V e resistência de corpo desprezível. Determine os seguintes valores esperados para esta atividade: a) tensão de pico do secundário (V_{pS}); b) tensão de pico na carga (V_{pL}); c) ângulo de disparo α e o correspondente intervalo de tempo t_α (em ms); d) ângulo de disparo β e o correspondente intervalo de tempo t_β (em ms). Lembre-se: $\alpha = \omega t_\alpha$ e $\beta = \omega t_\beta$

Meça a tensão de pico V_{pS} do secundário. Para ter maior precisão, meça a amplitude pico a pico e divida por 2. Meça a tensão de pico e a tensão mínima de V_{pL} – verifique se o mínimo é realmente zero, como esperado.

Anotação 2b Anote as amplitudes V_{pS} e V_{pL} . Calcule a tensão de limiar V_{D0} do diodo pela diferença entre as tensões de pico. Compare com o previsto no pré-relatório.

Anotação 2c Meça e anote os tempos t_α (disparo) e t_β (condução do diodo) em ms.

Anotação 2d Esboce à mão livre 2 períodos dos sinais V_S e de V_L de forma sincronizada. Atente para a distorção harmônica de V_S . Indique as tensões mínimas e máximas, os tempos t_α e t_β e o período (em ms). Reserve espaço para desenhar a próxima forma de onda.

Anotação 2e Anote a hora atual e mostre o circuito funcionando e suas conclusões para o professor.

Atividade 3 Tensão sobre o diodo retificador

Vamos observar com o osciloscópio a forma de onda da tensão V_D sobre o diodo: coloque os dois canais na mesma escala vertical (V/div) e ative a função “Ch1 – Ch2” (botão MATH).

Para ajustar a escala do sinal (Ch1 – Ch2), selecione o menu “Escala Vertical” pressionando o botão ao lado deste (na lateral direita da tela) e gire o knob de ajuste (a direita do topo da tela). Para ajustar a posição vertical desse sinal, selecione o menu “Posição” e ajuste pelo knob.

Anotação 3a Anote as tensões máxima e mínima de V_D e compare com o previsto no pré-relatório

Anotação 3b Complete o gráfico da atividade anterior: esboce o sinal observado de forma sincronizada com os demais. Indique as tensões mínimas e máximas de V_D , os tempos t_α e t_β e o período (em ms).

Anotação 3c Anote a hora atual e mostre o circuito funcionando e suas conclusões para o professor.

Atividade 4 Filtro capacitivo no retificador de meia onda

No laboratório, dispomos de apenas alguns valores para capacitores eletrolíticos (economia, economia...). No retificador de meia onda, usaremos um capacitor de 100 μ F, eletrolítico.

Exercício 3 Faça o diagrama elétrico do circuito a ser montado, incluindo o transformador. Indique os pontos em que os canais 1 e 2 e o TERRA do osciloscópio serão conectados. Junto aos componentes, anote o nome de

identificação e código comercial ou valor comercial (ex: “D 1N4001”, “R_L 1k”). O código do diodo deve ser o escolhido no Exercício 5.

Anotação 4a Caso seu esquema elétrico tenha sido considerado satisfatório pelo professor, NÃO é necessário refazê-lo – indique no relatório qual projeto foi escolhido para ser montado. CASO CONTRÁRIO, faça o esquema corretamente no relatório.

ATENÇÃO: NÃO LIGUE O CAPACITOR COM A POLARIDADE INVERTIDA! Coloque o multímetro **em modo DC** e verifique a polaridade da tensão sobre o resistor R_L com o multímetro **ANTES** de conectar o capacitor.

Conecte o capacitor em paralelo com a carga. Observe a tensão V_S de entrada no canal 1 do osciloscópio e a tensão V_L na carga no canal 2 (em DC). Amplie o canal 2 e meça **com precisão** os valores máximo e mínimo de V_L .

Exercício 4 Dados os valores dos componentes e tensões a serem usados nesta atividade, determine (use a aproximação por retas): a amplitude de ondulação V_r , o período da ondulação T_r , o tempo de condução t_β (lembre-se: $\beta = \omega t_\beta$) e a corrente de surto $I_{D_{\max}}$ do diodo

Exercício 5 Consulte o *datasheet* dos diodos da série 1N4000 e selecione um diodo que atenda V_R (tensão de pico reversa), I_{mD} e $I_{D_{\max}}$ calculados acima.

Em seguida meça **com precisão** a amplitude da ondulação V_r . Como agora estamos interessados na amplitude pico a pico, passe o canal 2 para modo **AC** e amplie para ver em detalhes um período de V_L .

Exercício 6 Esboce a curva de tensão V_L que se teria SEM o capacitor, e SOBREPOSTA a ela desenhe a curva de tensão resultante COM o capacitor (desenhe pelo menos 2 períodos). Indique os valores mínimos e máximos de cada um e o período das ondas (em milissegundos).

Anotação 4b Esboce o sinal V_L e indique as tensões mínima, máxima, a ondulação V_r e o período da onda (em ms). Compare com os valores previstos no pré-relatório.

Anotação 4c Anote a hora atual e mostre o circuito funcionando e suas conclusões para o professor.

Atividade 5 Retificador de onda completa com ponte de diodos

Vamos montar o retificador em ponte com quatro diodos e alimentá-lo com 8 V eficazes. Conecte na saída o resistor de 1 k Ω . Use o mesmo tipo de diodo da atividade anterior: pegue mais três.

Exercício 7 Faça o diagrama elétrico do circuito incluindo o transformador. Use a representação da ponte mostrada na Figura 6.8 (sem o capacitor, claro) – é mais fácil conferir a montagem com ela. Indique os pontos em que o canal 1 e o TERRA do osciloscópio serão conectados. Junto aos componentes, anote o nome de identificação e código comercial ou valor comercial (ex: “D₁ 1N4001”, “R_L 1k”).

Anotação 5a Caso seu esquema elétrico tenha sido considerado satisfatório pelo professor, NÃO é necessário refazê-lo – indique no relatório qual projeto foi escolhido para ser montado. CASO CONTRÁRIO, faça o esquema corretamente no relatório.

ATENÇÃO: Verifique a montagem da ponte (principalmente a polaridade dos diodos) antes de ligar o transformador (o terminal N do transformador NÃO É o terra do circuito!)

Observe a tensão de saída V_L sobre o resistor de carga R_L no canal 1 (em DC) do osciloscópio. Neste circuito não podemos ver simultaneamente a tensão V_S de entrada no outro canal porque o terra do nosso osciloscópio é comum aos dois canais. Desligue o canal 2 e não conecte-o ao circuito.

LEMBRE-SE: o terra da ponta do canal 1 deve ser ligada no outro terminal do resistor.

Exercício 8 Os diodos desta atividade são de silício e possuem resistência de corpo desprezível. Determine os seguintes valores esperados para esta atividade: a) tensão de pico do secundário (V_{pS}); b) tensão de pico na carga (V_{pL}); c) ângulo de disparo α e o correspondente intervalo de tempo t_α (em ms); d) ângulo de disparo β e o correspondente intervalo de tempo t_β (em ms). Esboce de forma sincronizada as curvas da tensão de secundário V_S e da tensão de saída V_L (NÃO sobreponha as curvas). Indique os valores mínimos e máximos de tensão, os tempo t_α e t_β e o período das ondas (em ms).

Anotação 5b Anote a tensão de pico V_{pL} na carga e compare com o previsto no pré-relatório.

Anotação 5c Meça e anote os tempos t_α e t_β (para medir t_α , meça o intervalo entre dois semiciclos e divida por 2 – veja a Figura 6.5). Compare com o previsto no pré-relatório.

Anotação 5d Caso suas formas de onda tenham sido consideradas satisfatórias pelo professor, NÃO é necessário copiá-las. CASO CONTRÁRIO esboce os sinais V_S e V_L de forma sincronizada e indique as tensões mínimas e máximas, os tempos t_α e t_β e o período da onda (em ms).

Anotação 5e Anote a hora atual e mostre o circuito funcionando e suas conclusões para o professor.

Atividade 6 Filtro capacitivo no retificador em ponte

Neste circuito, use um capacitor de 47 μF para filtrar a tensão retificada.

Exercício 9 Faça o diagrama elétrico do circuito a ser montado, incluindo o transformador. Use a representação da ponte mostrada na Figura 6.8. Indique os pontos em que o canal 1 e o TERRA do osciloscópio serão conectados. Junto aos componentes, anote o nome de identificação e código comercial ou valor comercial (ex: “D₁ 1N4001”, “R_L 1k”).

Anotação 6a Caso seu esquema elétrico tenha sido considerado satisfatório pelo professor, NÃO é necessário refazê-lo – indique no relatório qual projeto foi escolhido para ser montado. CASO CONTRÁRIO, faça o esquema corretamente no relatório.

ATENÇÃO: NÃO LIGUE O CAPACITOR COM A POLARIDADE INVERTIDA! Confirme a polaridade da tensão de saída com o multímetro em modo DC antes de conectar o capacitor.

Exercício 10 Dados os valores dos componentes e tensões a serem usados nesta atividade, determine (use a aproximação por retas): a amplitude de ondulação V_r , o período da ondulação T_r , o tempo de condução t_β (lembre-se: $\beta = \omega t_\beta$) e a corrente de surto $I_{D_{\max}}$ em um dos diodos. LEMBRE-SE: neste caso o período de V_L é a metade do período de entrada, e portanto $\tau_r = \pi$.

Conecte o capacitor escolhido em paralelo com a carga. Observe no canal 1 do osciloscópio (em DC) a tensão V_L na carga. Amplie e meça os valores máximo e mínimo de V_L .

Passa o canal 1 para modo AC e amplie para ver em detalhes um período de V_L . Meça a amplitude (pico a pico) da ondulação V_r .

Anotação 6b Esboce a forma de onda de V_L e indique as tensões mínimas e máximas, a ondulação V_r e o período da onda. Compare com os valores previstos no pré-relatório.

Anotação 6c Anote a hora atual e mostre o circuito funcionando e suas conclusões para o professor.

Atividade 7 Finalização

Deixe a bancada em ordem e limpa. Falhas nesse procedimento serão penalizadas.

Anotação 7a Verifique e anote no relatório cada um dos itens abaixo. ESCREVA os nome dos itens e não apenas uma seqüência de meros “sim” e “não”

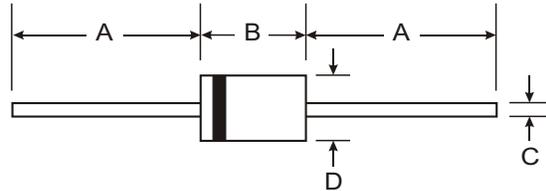
- ✓ **Equipamentos** Liste todos os equipamentos usados. Todos estão desligados?
- ✓ **Multímetro** Os cabos das pontas de prova do multímetro estão arrumados? Deixe o multímetro sobre o **tampo baixo da bancada**, para que possamos conferir facilmente se está desligado.
- ✓ **Osciloscópio** Os cabos das pontas de prova do osciloscópio estão arrumados?
- ✓ **Cabos** Os cabos usados foram recolocados nos lugares de origem?
- ✓ **Cabinhos** (para protoboard): há **16** cabinhos de cores variadas? Estão em bom estado?
- ✓ **Componentes** Foram guardados nas devidas gavetas? Há algum componente ou cabinho caído sobre ou embaixo da mesa?
- ✓ **Empréstimos** Usou alguma coisa de outra bancada? O quê? Foi devolvido?
- ✓ **Defeitos** Encontrou algum defeito? Preencheu a Comunicação de Defeito?
- ✓ **Limpeza** A bancada está limpa?

Entregue o relatório feito em sala. O relatório deve conter:

1. As anotações indicadas nas atividades da parte prática
2. O seu pré-relatório.

Features

- Diffused Junction
- High Current Capability and Low Forward Voltage Drop
- Surge Overload Rating to 30A Peak
- Low Reverse Leakage Current
- Plastic Material: UL Flammability Classification Rating 94V-0



Mechanical Data

- Case: Molded Plastic
- Terminals: Plated Leads Solderable per MIL-STD-202, Method 208
- Polarity: Cathode Band
- Weight: DO-41 0.30 grams (approx)
A-405 0.20 grams (approx)
- Mounting Position: Any
- Marking: Type Number

Dim	DO-41 Plastic		A-405	
	Min	Max	Min	Max
A	25.40	—	25.40	—
B	4.06	5.21	4.10	5.20
C	0.71	0.864	0.53	0.64
D	2.00	2.72	2.00	2.70

All Dimensions in mm

"L" Suffix Designates A-405 Package
No Suffix Designates DO-41 Package

Maximum Ratings and Electrical Characteristics @ T_A = 25°C unless otherwise specified

Single phase, half wave, 60Hz, resistive or inductive load.
For capacitive load, derate current by 20%.

Characteristic	Symbol	1N 4001/L	1N 4002/L	1N 4003/L	1N 4004/L	1N 4005/L	1N 4006/L	1N 4007/L	Unit
Peak Repetitive Reverse Voltage Working Peak Reverse Voltage DC Blocking Voltage	V _{RRM} V _{RWM} V _R	50	100	200	400	600	800	1000	V
RMS Reverse Voltage	V _{R(RMS)}	35	70	140	280	420	560	700	V
Average Rectified Output Current (Note 1) @ T _A = 75°C	I _O	1.0							A
Non-Repetitive Peak Forward Surge Current 8.3ms single half sine-wave superimposed on rated load (JEDEC Method)	I _{FSM}	30							A
Forward Voltage @ I _F = 1.0A	V _{FM}	1.0							V
Peak Reverse Current @ T _A = 25°C at Rated DC Blocking Voltage @ T _A = 100°C	I _{RM}	5.0 50							μA
Typical Junction Capacitance (Note 2)	C _j	15				8			pF
Typical Thermal Resistance Junction to Ambient	R _{θJA}	100							K/W
Maximum DC Blocking Voltage Temperature	T _A	+150							°C
Operating and Storage Temperature Range (Note 3)	T _j , T _{STG}	-65 to +175							°C

- Notes:
1. Leads maintained at ambient temperature at a distance of 9.5mm from the case.
 2. Measured at 1. MHz and applied reverse voltage of 4.0V DC.
 3. JEDEC Value

